

1.3GHz 单 cell 高梯度低损耗超导腔设计研究^{*}

葛明骥¹⁾ 赵升初 孙虹 高杰

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 计划中的国际直线对撞机(简称ILC),已确定采用低温超导技术.研究表明,ILC的整体造价与超导腔的加速梯度密切相关,因此新型高梯度超导腔的研制,已成为目前ILC的热门课题.目前超导腔加速梯度的提高受限于超导体射频频临界磁场(H_c^{rf}),希望通过腔形的优化设计,来减小超导腔表面峰值磁场与加速梯度的比值(H_p/E_{acc}),进而提高超导腔的加速梯度,以满足ILC的要求.目前,具有代表性的高梯度超导腔新腔形有两种,即低损耗超导腔(LLSCC)和重入式超导腔(RESCC).LLSCC相对于RESCC而言,具有较低的 H_p/E_{acc} ,因此在理论上LLSCC更易于达到较高的梯度.作者对1.3GHz单cell高梯度低损耗超导腔的腔形进行了详细的研究,给出了相应低损耗超导腔腔形,并对这一设计结果进行了分析比较.

关键词 超导腔 低损耗超导腔 重入式超导腔 国际直线对撞机

1 引言

计划中的国际直线对撞机(International Linear Collider 简称ILC),是继欧洲核子研究中心(CERN)正在建造的大型强子对撞机(LHC)之后的下一代高能加速器.国际直线对撞机的核心技术是粒子加速技术,国际未来加速器委员会经过详细论证,最终将ILC的粒子加速方案确定为低温超导加速方案.这一重大决定,为国际直线对撞机关键技术的研究确定了方向.2004年11月,在日本召开的首届国际直线对撞机研讨会上(1st ILC Workshop),各国与会专家就ILC的整体造价与超导腔加速梯度的相关性做了充分地研究讨论.研究表明,如果能把超导腔的加速梯度 E_{acc} 从23.4MV/m(TESLA-500设计工作梯度)提高到35MV/m(TESLA-800设计梯度),在亮度要求不变和隧道长度不变的情况下,ILC的整体造价可以下降11%之多,而整体造价的最低点则出现在更高的加速梯度40MV/m附近^[1].因此研制更高梯度的新型超导腔对国际高能物理界是一个十分具有吸引力的目标,而这个目标是可望达到的.目前超导腔加速梯度的提高受限于超导体射频频临界磁场(H_c^{rf}),但人们

可以通过腔形的优化设计,来减小超导腔表面峰值磁场与加速梯度的比值(H_p/E_{acc}),进而提高超导腔的加速梯度.根据这一思路,人们提出了两种具有代表性的新型高梯度超导腔,即低损耗超导腔(LLSCC)和重入式超导腔(RESCC).由于LLSCC相对于RESCC而言具有较低的 H_p/E_{acc} ,在理论上LLSCC更易于得到较高的加速梯度.因此优先选择低损耗超导腔作为本文的研究对象.

本文将详细论述1.3GHz单cell高梯度低损耗超导腔的设计,给出相应低损耗超导腔的腔形,并对这一结果进行进一步的分析比较.

2 超导体射频频临界磁场对于超导腔加速梯度的限制

图1^[2]给出了L波段 $\beta = 1$ 单cell铌超导腔加速梯度的发展历程.从图中可以看出,自1995年以后,超导腔的加速梯度有了大幅提高,这主要是由于在超导腔表面处理过程中,采用了诸如高压超纯水冲洗(HPR)、电抛光(EP)等一系列新工艺,有效地克服了

2005-08-22 收稿, 2005-11-22 收修改稿

* 国家杰出青年科学基金(10525525)资助

1) E-mail: gemq@ihep.ac.cn

超导腔在高场强区的场致发射(FE);然而,从1995年至今的近10年内,尽管各国专家采用了不同的表面处理工艺,但超导腔的加速梯度却始终徘徊在40MV/m左右,并没有明显的提高。

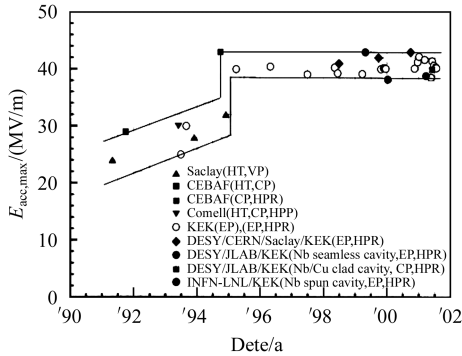


图1 L波段 $\beta=1$ 单cell超导腔加速梯度发展历程

人们逐渐发现,目前制约超导腔梯度提高的主要因素,在于超导腔表面峰值磁场(H_p)不能高于超导体射频频临界磁场(H_c^{rf}),即 $H_p \leq H_c^{rf}$,否则超导腔将失超。对于L波段 $\beta=1$ 的铌超导腔而言,40MV/m的加速梯度,对应于超导腔的表面峰值磁场(H_p)约为1750Oe。上述实验结果表明,目前超导腔表面峰值磁场(H_p)已经达到铌材的射频频临界磁场(H_c^{rf}),其值应在1750Oe左右。这一结论也被 $\beta=0.45$ 的质子腔^[3]、纯铌无缝超导腔和Nb/Cu复合超导腔^[4]所证实。

经典Bean模型^[5]给出的铌的临界射频磁场(H_c^{rf}),与上述实验结果不能很好地符合。因此需要构建新的理论模型^[1],见公式(1):

$$H_c^{rf}(T) = \sqrt{2} \frac{\xi(T)}{\lambda(T)} H_c(T) = \sqrt{2} \frac{H_c(T)}{\kappa(T)}, \quad (1)$$

式中的 H_c 是超导体热力学临界磁场, ξ 是相干长度, λ 是穿透深度, κ 是Ginzburg-Landau参量, $\sqrt{2}$ 表示了射频交流情况下的有效值。公式(1)中的诸参数均与温度相关,根据Abrikosov理论,公式(1)可以写为

$$H_c^{rf}(T) = \sqrt{2} \frac{H_c(0)}{\kappa(0)} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right], \quad (2)$$

式中 T_c 是超导体临界温度。公式(2)与Cornell University和KEK分别在不同温度下,对不同超导材料(包括铌在内)的射频频临界磁场的测试结果十分相符,结果如图2所示。从公式(2)中不难得出,铌在 $T=1.5-1.8$ K时, $H_c^{rf}=1750 \pm 50$ Oe。

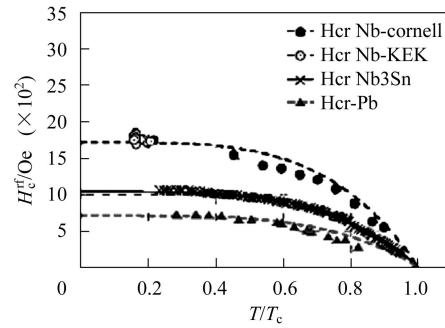


图2 不同材料 H_c^{rf} 的实验测量结果

3 两种新腔形的比较

由于超导体射频频临界磁场对于超导腔加速梯度的限制是难以克服的,但是可以通过改变超导腔的形状,来减小超导腔表面峰值磁场与加速梯度的比值(H_p/E_{acc}),进而得到更高的加速梯度。目前,提出的高梯度新腔形超导腔有两种基本的腔型:(1)由J.Sekutowicz提出的低损耗型超导腔(Low Loss Superconducting Cavity简称LLSCC)^[6];(2)由H.Padamsee等提出的重入式超导腔(Re-Entrant Superconducting Cavity简称RESCC)^[7]。上述两种腔形相比较,LLSCC具有较低的 H_p/E_{acc} ,同时具有较高的特性阻抗(R/Q)和特性阻抗与几何因子的乘积($(R/Q) \cdot G$)^[8]。 R/Q 高意味着在相同加速梯度之下,LLSCC具有更低的储能,而 $(R/Q) \cdot G$ 高意味着LLSCC具有更低的低温损耗,这也是低损耗超导腔名称的由来。在超导腔加工制造方面,LLSCC较之RESCC所需模具简单,且有较好的机械稳定性,并易于表面处理和清洗,因此理论上LLSCC更易于达到较高的加速梯度。而RESCC则具有相对较低的 E_p/E_{acc} ,以及可以选择较大的腔间耦合系数(K_{cc})^[8]。

顺便指出,J.Sekutowicz提出的1.5GHz低损耗超导腔的设计目标,是要得到高品质因数(Q_0)的超导腔,以满足CEBAF升级项目的要求。

4 低损耗超导腔的设计研究

4.1 设计要求

如上分析,超导腔的加速梯度受到射频频临界磁场(H_c^{rf})的限制,超导腔最高表面峰值磁场(H_p)应满足 $H_p \leq H_c^{rf}=1750 \pm 50$ Oe,因此为了得到加速梯度为45MV/m以上的超导腔, H_p/E_{acc} 应小于37Oe/(MV/m)。以现阶段超导腔表面处理工艺,可以有效地克服超导腔在高场区的场致发射(FE),所以不

必过分担心较高的超导腔表面峰值电场 (E_p), 但得到相对较低的 E_p/E_{acc} , 仍是设计超导腔时所追求的目标之一. 一般认为超导腔 E_p 的上限在100MV/m左右, 这样对于要求加速梯度为45MV/m的多cell超导腔来说, E_p/E_{acc} 应控制在2.3左右.

为了得到更加有效的加速, 要求多cell超导腔各cell间加速梯度的平直度 (flatness) 应好于95%. 各cell间加速梯度的平直度由(3)式给出^[1]

$$\Delta E_{acc} \propto \frac{N^2 \Delta f}{K_{cc}}, \quad (3)$$

式中 N 为多cell超导腔的cell数量, Δf 是cell之间的频率差. 以现在超导腔的制造水平, 可以将超导腔各cell间的频率差 Δf 调整到足够的小, 对于9cell的超导腔, 只要腔间耦合系数 $K_{cc} \geq 1.5\%$, 其加速梯度的平直度即可好于95%. 换言之, 对9cell的超导腔其加速梯度平直度如要求达到95%, 则其腔间耦合系数 K_{cc} 应当不小于1.5%.

综上所述, 对于可用于ILC的1.3GHz高梯度9cell低损耗纯铌超导腔, 其腔形设计要求为: H_p/E_{acc} 应小于37Oe/(MV/m); 同时尽可能减小 E_p/E_{acc} , 应在2.3左右; 而腔间耦合系数应不小于1.5%.

4.2 腔形设计

超导腔腔形见图3. 图中腔形各几何参量分别为: 单元腔长 L_c , 腔直径 D , 颈孔半径 R_i , 腔壁倾斜角 α , 腔顶椭圆半轴 A, B , 腔颈椭圆半轴 a, b .

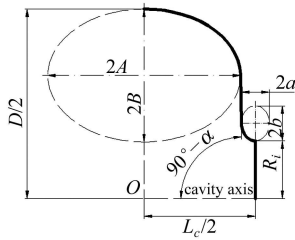


图3 超导腔几何参量(1/4腔形)

根据以往的设计经验可知^[9], 腔顶椭圆处于超导腔的磁场最强区域, 因此通过选择合适的腔顶椭圆半轴 A 和 B , 可有效地减小表面峰值磁场与加速梯度的比值 (H_p/E_{acc}). 在设计时, 尽量增大超导腔磁场区域的体积, 这样可以有效减小腔表面磁通密度, 从而减小 H_p/E_{acc} , 即在保持 B/A 不变的情况下, 增大 A 可以有效地减小 H_p/E_{acc} . 在确定 A 之后, 对 B/A 进行优化, 当 $B/A < 1$ 时 H_p/E_{acc} 会进一步减小. 而腔颈椭圆处于超导腔电场最强处, 通过腔颈椭圆半轴 a 和 b 的选择, 可有效地控制表面峰值电场与加速梯度的比值 (E_p/E_{acc}), 在保持 b/a 不变的情况下, 随着 a 的减小

H_p/E_{acc} 会略微减小, 而 E_p/E_{acc} 则会增大. 在 a 确定后, 优化 b/a 可进一步减小 E_p/E_{acc} , 而 b/a 的变化对于 H_p/E_{acc} 影响极小. 因此在选择 a 和 b/a 时, 应当根据上述对于电场比值的设计要求来选择, 使之尽量减小 H_p/E_{acc} , 而又将 E_p/E_{acc} 控制在2.3左右. 虽然通过减小颈孔半径 R_i , 也可减小 H_p/E_{acc} 和 E_p/E_{acc} , 但腔间耦合系数 (K_{cc}) 也将随 R_i 的减小而减小. 这就要求在 R_i 的选择时, 应当选择一个适中的 R_i 值, 即在考虑了足够腔间耦合的要求后, 选择尽可能小的 R_i , 以降低 H_p/E_{acc} 和 E_p/E_{acc} . 最后通过调整腔直径 D 使腔的工作频率达到1.3GHz.

显然, 在整个设计优化过程中, 需要大量重复地输入腔形参数, 为了提高计算效率, 使用VB语言编写了CavityDesign程序, 它包含3个基本模块: 前处理模块、求解模块和后处理模块, 其中求解模块采用电磁场模拟软件SUPERFISH程序, 这是因为SUPERFISH程序相对于以往的URMEL程序具有更高的精度; 而前处理模块可以将腔形参数转换为腔形几何坐标输入SUPERFISH程序, 后处理模块则负责从SUPERFISH程序中自动提取结果并进行计算处理, 进而得到所需的结果. 经设计优化后, 1.3GHz单cell高梯度低损耗超导腔的腔形几何参量和电磁特性如表1所示.

表1 1.3GHz单cell高梯度低损耗超导腔设计结果

1.3GHz单cell高梯度 低损耗超导腔设计结果	多cell中 间腔形	束管 单cell腔形
工作模式	π 模式	0模式
cell长度 L_c /mm		115.38
腔壁倾斜角 $\alpha/(\circ)$		1
颈孔半径 R_i /mm		30
腔直径 D /mm		196.66
腔颈椭圆短半轴 a /mm		7.25
腔颈椭圆长半轴 b /mm		9.05
腔顶椭圆长半轴 A /mm		50.00
腔顶椭圆短半轴 B /mm		34.50
束管长/mm	—	110
频率 f_0 /MHz	1300	1289.34
$G = R_s \cdot Q/\text{Ohm}$	285	283
$(R/Q)/\text{Ohm}$	133.1	138.2
E_p/E_{acc}	2.3	2.1
$(H_p/E_{acc})/(\text{Oe}/(\text{MV}/\text{m}))$	36.06	35.47
耦合系数 $K_{cc}(\%)$	1.54	—

5 腔形设计结果分析及比较

从表1中可以看到多cell低损耗超导腔的中间腔形的 H_p/E_{acc} 为36.06Oe/(MV/m), 因此理论上其加速梯度可以达到48MV/m以上, 这为实际制

造留下了一定的余地; 而 $E_p/E_{acc} = 2.3$, 如要求 $E_{acc} = 45\text{MV/m}$, E_p 约为 100MV/m ; 腔间耦合系数 $K_{cc} = 1.54\%$, 以上结果均满足设计要求. 上述中间腔形加上束管, 就是本文所要研究的 1.3GHz 单cell高梯度低损耗超导腔的设计结果(表1中的带束管单cell腔形一列), 用三维绘图软件即可得到其三维图像(图4), 与 TESLA-800型9cell超导腔相比, LLSCC其cell的形状显得“饱满”很多.

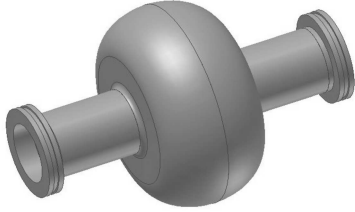


图4 1.3GHz单cell高梯度低损耗超导腔三维图

应当注意到对于本文研究的 1.3GHz 单cell高梯度低损耗超导腔, 其 H_p/E_{acc} 与 E_p/E_{acc} 较之多cell腔有所降低, 其中 E_p/E_{acc} 仅为 2.1 , 下降了近 9% . 这些对实际制造一个单cell高梯度低损耗超导腔都是十分有利的.

现将上述优化设计的结果和国内外不同腔型(TESLA-800^[10], Cornell RESCC^[7], DESY/KEK LLSCC^[8])的性能做一比较, 列于表2.

比较表2中的几种腔形, 我们设计的低损耗超导腔和 DESY/KEK 联合设计的 LLSCC 腔形十分接近, 具有相对较低的 H_p/E_{acc} , 有利于达到较高的梯度; 而 E_p/E_{acc} 相对于重入式超导腔相差无几, 并不构成难度; 虽然 LLSCC 的腔间耦合系数 K_{cc} , 相对于 TESLA

和 RESCC 较低最低, 但略高于 DESY/KEK 的设计, 而且如前所述, 对于 9cell 超导腔来说, 以现有的技术水平, 完全可以使其加速梯度平直度好于 95% . 最后所需要提到的是, 从加工和表面处理的角度看, 低损耗超导腔均要优于重入式超导腔, 但即使是这样, 在多cell应用的情况下, 使用加强筋(Stiffening Ring)来减小洛伦兹力造成的失谐仍是十分必要的.

表2 结果比较

	TESLA-800 (DESY)	RESCC (CORNELL)	LLSCC (IHEP)	LLSCC (DESY/KEK)
频率 f_0/MHz	1300	1300	1300	1300
$G = (Rs \cdot Q)/$ (Ohm)	271	278	285	284
$(R/Q)/(\text{Ohm})$	113.8	126.8	133.1	134
$(H_p/E_{acc})/$ (Oe/(MV/m))	42.6	37.8	36.06	36.1
E_p/E_{acc}	2.0	2.2	2.3	2.36
耦合系数 $K_{cc}(\%)$	1.89	2.38	1.54	1.52
$((R/Q) \cdot G)/$ (Ohm ²)	30840	35250	37934	37970

6 结论

超导腔的加速梯度受限于超导体临界射频磁场 (H_c^{rf}). 改变超导腔的腔形, 可以减小超导腔表面峰值磁场与加速梯度的比值 (H_p/E_{acc}), 进而提高超导腔的加速梯度. 低损耗超导腔是目前具有代表性的高梯度新腔形超导腔之一. 本文给出的 1.3GHz 高梯度低损耗超导腔腔形, H_p/E_{acc} 仅为 $36.06\text{Oe}/(\text{MV/m})$, 而 E_p/E_{acc} 为 2.3 , 腔间耦合系数 K_{cc} 达到 1.54% , 均完全可以满足 ILC 提高超导腔加速梯度的要求.

参考文献(References)

- Adolphsen C. Cost and Operational Implications of the Gradient Choice, 1st ILC-WS. 2004
- Saito K et al. Proc. of the 29th Linear Accelerator Meeting. 2004. 81—83
- Saito K et al. Proc. of the SRF2001. 2001. 588—590
- Singer W et al. Proc. of the SRF2001. 2001. 170—176
- ZHANG Yu-Heng. Superconductive Physics. Hefei: University of Science and Technique of China Publisher, 1997. 209—214 (in Chinese)
(张裕恒. 超导物理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997. 209—214)
- Sekutowicz J et al. Proc. of the 2003 Particle Accelerator Conf. 2003. 1395—1397
- Shemelin V, Padamsee H et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A496**(1): 1—7
- Sekutowicz J. New Cavity Shapes for Higher Gradient, 1st ILC-WS. 2004
- ZHAO Sheng-Chu, SUN Hong et al. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2003, **20**(1): 57—61 (in Chinese)
(赵升初, 孙虹等. 中国科学院研究生院学报, 2003, **20**(1): 57—61)
- Aune B et al. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2000, **3**: 092001

Design Study on 1.3GHz Mono-cell High Gradient Low Loss Superconducting Cavity^{*}

GE Ming-Qi¹⁾ ZHAO Sheng-Chu SUN Hong GAO Jie

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract Superconducting (SC) RF technology is an excellent choice for International Linear Collider (ILC), and the whole cost of ILC is closely related to the gradient of SC cavity. However, the gradient of Nb SC cavity is limited by SRF critical magnetic field at present. So it is very necessary to optimize the cavity shape to decrease the ratio of surface peak magnetic field and accelerating gradient (H_p/E_{acc}). A serial of new cavity shapes have been proposed including Low Loss shape and Re-Entrant shape etc. Low Loss shape has lower H_p/E_{acc} than Re-Entrant shape, so theoretically Low Loss shape can reach higher gradient. In this paper, an optimal design is illustrated. Then a Low Loss SC Cavity shape and its calculation results are presented, and finally these results are compared with TESLA 800 cavity and Re-Entrant Cavity.

Key words superconducting cavity, LLSCC, RESCC, international linear collider

Received 22 August 2005, Revised 22 November 2005

^{*}Supported by National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (10525525)

1) E-mail: gemq@ihep.ac.cn